



HAL
open science

Analyse de sensibilité d'un système de propulsion hybride électrique pour des futurs avions

Matthieu Pettes-Duler, Bruno Sareni, Xavier Roboam

► To cite this version:

Matthieu Pettes-Duler, Bruno Sareni, Xavier Roboam. Analyse de sensibilité d'un système de propulsion hybride électrique pour des futurs avions. JCGE (Journées Jeunes Chercheurs en Génie Electrique), Jun 2019, Oléron, France. hal-02489965

HAL Id: hal-02489965

<https://hal.science/hal-02489965>

Submitted on 24 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse de sensibilité d'un système de propulsion hybride électrique pour des futurs avions.

Matthieu PETTES-DULER, Xavier ROBOAM, Bruno SARENI

LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, France

2, rue Charles Camichel - BP 7122 - 31071 Toulouse cedex 7, France

pettes@laplace.univ-tlse.fr

RESUME – Dans cet article, une méthode pour l'analyse de sensibilité a été mise en place nous permettant de savoir quels sont les paramètres les plus impactants de notre modèle vis-à-vis des principaux critères de conception. Une étude globale de sensibilité sur la masse maximale admissible au décollage ainsi que sur la masse de carburant à embarquer a tout d'abord été menée à partir des puissances spécifiques et des rendements. Celle-ci montre le fort coupage entre la performance de notre architecture hybride-électrique selon les puissances spécifiques et le rendement de chaque composant électrique. Dans le but de pouvoir dimensionner correctement le système de propulsion, cette étude est actuellement déployée sur nos modèles de dimensionnement de systèmes électriques, ceci afin de déterminer localement les paramètres les plus sensibles à la conception de notre système électrique. Dans notre cas, il s'agit d'appliquer notre analyse de sensibilité sur un maillon déterminant de notre chaîne de propulsion : le moteur électrique. Les indices de Sobol sont utilisés pour cette analyse de sensibilité

ABSTRACT – A sensitivity model has been developed in this paper in the framework of a hybrid-electric powertrain design. This analysis allows finding the most impacting input variables in our design models. A first global analysis has been made from specific powers and efficiencies of the electric components. In order to design and later to optimize the overall hybrid-electric powertrain, a sensitivity analysis requires to be done for each electric component design models in order to emphasize the most sensitive input variables. In our case we focus the analysis on the main electric part of the propulsive system : the electric motor. The Sobol indice method is used for the sensitivity analysis.

MOTS-CLES – Propulsion hybride-électrique – analyse de sensibilité – indices de Sobol - conception intégrée – optimisation.

1. Introduction

La croissance phénoménale du transport aérien pose de sérieux défis pour pouvoir accueillir un nombre de passagers de plus en plus grand, mais le problème de l'empreinte environnementale est crucial et constitue la cible principale du projet européen CleanSky (www.cleansky.eu). La thématique de l'avion (plus) électrique vise justement à réduire les émissions de gaz à effet de serre afin de stopper la croissance en carbone. Les ingénieurs du domaine aéronautique remplacent au fur et à mesure des équipements conventionnels par des systèmes électriques [1]. Dans le cadre de CleanSky, le projet européen HASTECS (Hybrid Aircraft Academic reSearch on Thermal and Electric Components and Systems) vise à trouver les technologies de rupture les plus efficaces et légères dans le cadre de la propulsion hybride-électrique des futurs avions. Dans notre cas, le travail à effectuer est l'intégration au niveau système de plusieurs modèles de dimensionnement dans le but d'optimiser le système de propulsion dans sa globalité. La NASA [2] a fait une analyse et une optimisation multi disciplinaire (MDO) sur un futur avion à propulsion hybride-électrique parallèle en le comparant aux avions conventionnels. Le constat est sans appel : en passant d'une architecture thermique à une architecture hybride-électrique, le poids des équipements électriques alourdit la masse au décollage. Dans ce cas, la NASA a choisi une propulsion hybride-électrique parallèle mais l'étude menée entre le LAPLACE, l'ICA et Airbus par J.Thauvin [3] a permis de comparer tous les concepts de propulsion hybride-électrique en prenant en compte non seulement les gains énergétiques mais aussi les avantages aérodynamiques. Les systèmes de propulsion hybride-parallèle, turboélectrique, partiellement turboélectrique et tout électrique ont été étudiés au cours de cette thèse. Les résultats sont tout aussi proches de l'étude de la NASA : la masse admissible au décollage est plus importante, d'où le fort intérêt pour les concepteurs de systèmes électriques d'optimiser au maximum leur système afin d'atteindre des densités de puissance et des rendements suffisants pour la propulsion aéronautique. Mais afin de préparer au mieux l'optimisation d'un système complet de propulsion, en focalisant sur les principaux degrés de liberté, l'analyse de sensibilité des modèles est un outil intéressant. Dans cet article, une méthode de sensibilité a été mise en place permettant de savoir quels sont les paramètres les plus impactants de notre modèle de dimensionnement de système propulsif. Dans un premier temps, une étude globale de sensibilité sur les puissances spécifiques et les rendements a été faite sur la masse maximale admissible au décollage ainsi que sur la masse de carburant à embarquer. Mais afin de pouvoir dimensionner correctement le système de propulsion en question, il faut déployer cette étude sur des modèles de conception de sous-systèmes : dans notre cas, il s'agira dans ce

papier d'appliquer l'analyse de sensibilité sur un maillon de notre chaîne de propulsion : le moteur électrique. Nous faisons appel à la méthode selon les indices de Sobol pour effectuer cette analyse de sensibilité [5-7], cette approche étant aussi décrite en section 4.

2. Contexte et processus d'intégration.

Un système de propulsion hybride-électrique série est composé de turbines à gaz qui entraînent mécaniquement des générateurs électriques, ceux-ci alimentant un bus uHVDC (ultra High Voltage Direct Current, c'est à dire avec des valeurs de tension dépassant le $\pm 270V$ qui constitue le standard HVDC en aéronautique). De la même manière, ce bus uHVDC est alimenté (hybridé) par des piles à combustible accompagné d'un stockage liquide en hydrogène. Le bus alimente des ensembles propulsifs à puissance électrique constitués d'onduleurs-machine qui entraînent des hélices. Notre processus de conception systémique est bouclé (Figure 1 : processus d'intégration système d'une architecture hybride-électrique série.). Ce processus, présenté dans un précédent article [4], permet d'estimer la masse admissible au décollage (MTOW) ainsi que la masse de carburant nécessaire (grâce à notre modèle de turbines à gaz) pour une mission donnée. Ce bouclage se base sur une hypothèse simple : le ratio des masses admissibles au décollage est égal au ratio des poussées d'avion en début et fin de boucle :

$$\frac{Poussée_{fin}}{Poussée_{début}} = \frac{MTOW_{fin}}{MTOW_{début}} \quad 1.$$

Notre processus prend comme référence (ref) un avion conventionnel (thermique) avec un système de propulsion adapté. Puis, nous ajoutons les masses des différents systèmes électriques dont l'addition permet de redéfinir une nouvelle poussée, le processus étant rebouclé jusqu'à convergence vers une solution stable en quelques itérations.

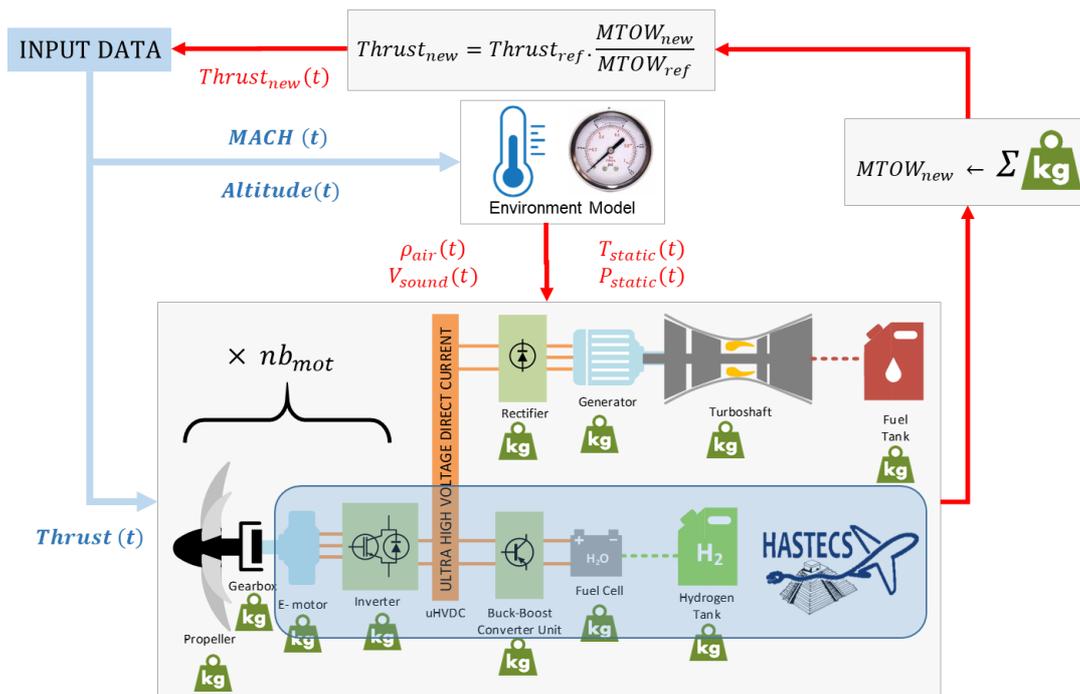


Figure 1 : processus d'intégration système d'une architecture hybride-électrique série.

Cette hypothèse de linéarisation masse poussée (Eq. 1) a été vérifiée en comparant un modèle aérodynamique [3] avec notre processus bouclé (Figure 1). A partir d'un avion de référence de 20 T, les deux processus ont été évalués pour un avion de masse augmentée à 26 T : les résultats obtenus sont quasi-similaires pour les deux modèles ce qui permet de valider notre hypothèse [4]. Nous pouvons désormais nous consacrer à l'analyse de sensibilité de la chaîne de propulsion.

3. Analyse globale de système de propulsion à partir d'hypothèses simples.

Afin de dimensionner la totalité du système de propulsion, nous avons en premier lieu pris des hypothèses simples concernant les sous-systèmes électriques en utilisant des densités de puissances et des rendements constants, tel que présenté dans le tableau suivant :

Tableau 1. Hypothèses sur les sous-systèmes électriques utilisés.

	Cible 2025	Cible 2035	Cible 20xx
Moteur/Générateur électrique			
Densité de puissance	5 kW/kg	10 kW/kg	15 kW/kg
Rendement	96%	98.5%	99%
Electroniques de puissance			
Densité de puissance	15 kW/kg	25 kW/kg	35 kW/kg
Rendement	98%	99.5%	99.8%
Piles à Combustibles – Stockage hydrogène liquide			
Densité de puissance stack		4 kW/kg	
Densité de puissance auxiliaires		1.3 kW/kg	
Densité énergétique hydrogène + stockage		3.3 kWh/kg	
Bus DC			
uHVDC		2000V	

Dans ce tableau, nous considérons diverses « cibles » technologiques correspondant à des niveaux graduels d'optimisation. Les résultats d'analyse sont présentés avec comme référence un avion hybride-électrique avec les cibles technologiques dites « de 2025 ». La distribution des sources et l'architecture étudiée ont été présentées dans [4].

La Figure 2 présente les gains obtenus sur la masse globale au décollage (MTOW) et sur le carburant consommé si l'on passait du niveau de cible 2025 aux niveaux 2035 (rectangles oranges) ou 20XX (rectangles gris). Les effets sont visualisés séparément sur les sous-systèmes de conversion électromécanique et de conversion statique (partie gauche) puis de façon couplée sur l'ensemble de la chaîne de propulsion (partie droite). Ces résultats montrent que nous avons une forte sensibilité de la performance technologique entre densités de puissances, rendements et masse admissible au décollage ou encore masse de carburant à embarquer. L'évolution technologique sur nos systèmes électriques peut permettre d'économiser de la masse au niveau de notre avion et ainsi du carburant à embarquer.

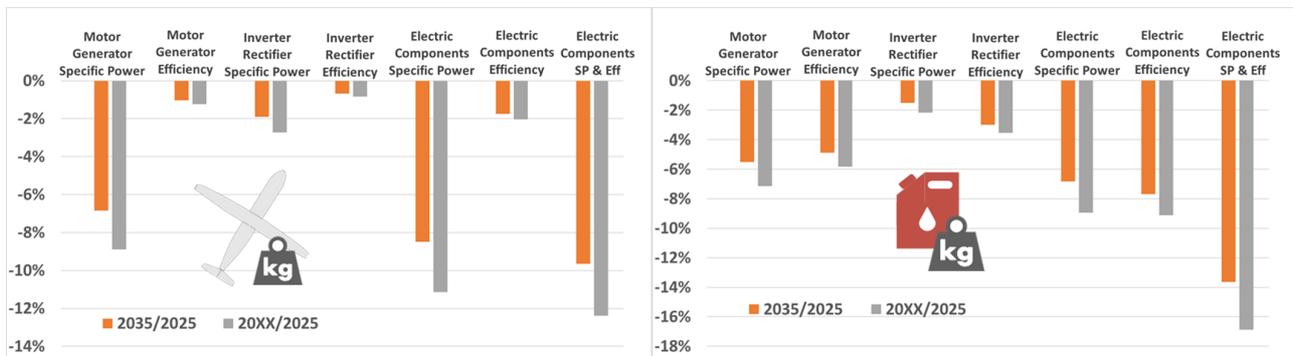


Figure 2: Variations de masse au décollage par rapport à l'amélioration technologique du/des systèmes électriques (gauche). Variations de masse de carburant par rapport à l'amélioration technologique du/des systèmes électriques (droite).

Nous pouvons souligner la différence d'impact entre l'amélioration des sous-systèmes de conversion électromécanique (moteur électrique et générateur électriques) par rapport à celle des électroniques de puissance qui bien que non négligeable est moins sensible. C'est pourquoi nous devons au mieux optimiser les sous-systèmes électriques de notre chaîne propulsive, et en premier lieu les machines électriques. Pour cela, nous devons étudier plus en détail chaque modèle de dimensionnement.

4. Analyse de sensibilité basée sur les indices de Sobol

L'objectif principal de cette partie est d'étudier la sensibilité, à savoir les variations de la (ou des) sortie(s) d'un modèle par rapport à ses variables d'entrées. La manière la plus simple consiste à changer un seul paramètre à la fois et de voir l'impact qu'a ce paramètre sur la réponse étudiée. Mais il s'agit là de méthodes locales qui masquent les corrélations entre paramètres d'entrée. L'analyse de sensibilité permet de mieux comprendre le comportement de notre système et notamment d'appréhender les couplages entre paramètres d'entrées et leurs impacts en sortie. Elle permet également d'identifier les variables les plus influentes de notre modèle.

De nombreuses publications font appel aux indices de Sobol, indices qui proviennent d'une méthode globale de sensibilité basée sur la variance. Par exemple, dans [5], les indices de Sobol sont présentés dans un contexte de variables d'entrées

dépendantes. Dans cet article, des indices plus généralisés de Sobol sont utilisés. De la même manière que précédemment, la référence [6] présente des indices généralisés de Sobol permettant de résoudre des problèmes avec des variables d'entrées dépendantes. Nous utiliserons dans notre cas ces indices avec des variables indépendantes.

Pour présenter ces indices nous commencerons par définir l'espérance mathématique d'une variable aléatoire (dans notre cas Y est la sortie de notre modèle) qui est la moyenne des valeurs prises par cette variable ; nous notons cela de la manière suivante :

$$\mathbb{E}(Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = m \tag{2}$$

La variance de cette grandeur est la moyenne des carrés des écarts avec la moyenne ; pour un tirage fini n nous avons :

$$Var(Y) = \mathbb{E}(Y - \mathbb{E}(Y))^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - m)^2 \tag{3}$$

Avec m la moyenne des tirages de Y (ou l'espérance de Y). A l'aide du théorème de la variance totale et en supposant que les variables sont indépendantes, nous pouvons la décomposer en une somme de termes :

$$Var(Y) = \sum_{i=1}^{nb_{inputs}} V_i + \sum_{i<j}^{nb_{inputs}} V_{ij} + \dots \tag{4}$$

$V_i = Var(\mathbb{E}(Y|X_i))$ qui représente la variance des valeurs moyennes de sortie « sachant X_i », c'est-à-dire à X_i donné

$V_{ij} = Var(\mathbb{E}(Y|X_i, X_j)) - V_i - V_j$ qui sous-tend les corrélations entre 2 paramètres d'entrée X_i, X_j .

Dans ce cas, X_i est la $i^{\text{ème}}$ variable d'entrée de notre modèle. En normalisant chaque terme de cette décomposition, nous obtenons les indices de Sobol d'ordre 1 jusqu'à l'ordre maximal qui dépend du nombre de variables.

$$S_i = \frac{V_i}{Var(Y)} \quad ; \quad S_{ij} = \frac{Var(\mathbb{E}(Y|X_i, X_j))}{Var(Y)} - S_i - S_j \quad \text{and} \quad \sum_{i,j,k}^{nb_{inputs}} S_i + S_{ij} + S_{ijk} + \dots = 1 \tag{5}$$

Nous sommes dans le cas où les variables sont indépendantes et par conséquent la somme de tous ces indices fait 1.

Un autre indice de Sobol, appelé indice total, permet d'obtenir toutes les informations sur la variable considérée (i) : cet indice permet de mesurer l'influence de X_i seule, mais en incluant également l'effet de ses interactions avec les autres variables du modèle. Il se calcule de la manière suivante :

$$S_i^T = 1 - \frac{Var(\mathbb{E}(Y|X_{[1:nb_{input}] \setminus \{i\}}))}{Var(Y)} \tag{6}$$

L'indice total S_i^T s'assimile donc à la somme de l'indice de premier ordre pour la variable X_i et des indices d'ordre supérieurs (toutes les corrélations avec la variable X_i).

Le calcul numérique de tels indices mène classiquement à des problèmes d'explosion combinatoire, causé par un grand nombre de variables d'entrées. Des approches spécifiques sont ainsi développées pour calculer ces indices de sensibilité sans engendrer des coûts de calcul prohibitifs. La technique utilisée ne sera pas présentée dans cet article mais est détaillée par la référence [7]. Dans notre application au modèle de dimensionnement de machine électrique, nous avons déterminé un nombre de variables indépendantes d'entrée que nous faisons varier entre deux bornes inférieure et supérieure.

Tableau 2. Variables d'entrées pour l'analyse de sensibilité du modèle machine électrique.

Variabiles d'entrées	Borne inférieure	Borne supérieure
Pem_{siz} [%]	80	130
N_{siz} [%]	80	150
f_T [Pa]	40000	148500
J_{rms} [A/mm ²]	6	25
$B_{gap_{max}}$ [T]	0.8	1.05
$B_{teeth_{max}}$ [T]	1	1.53
$B_{yoke_{max}}$ [T]	1	1.53
$R_{drot_{lm}}$ [%]	0.25	1.25
$B_{yokerot_{max}}$ [T]	0.7	1.5
V_{uHVDC} [V]	1000	3000
n_{epp} [-]	1	4
p [-]	2	10

Pem_{siz} , N_{siz} sont les points de dimensionnement en puissance et vitesse de rotation de la machine par rapport à notre profil. f_T représente la pression tangentielle au niveau de l'entrefer. Les inductions du champ magnétique dans l'entrefer, au niveau de la dent, dans la culasse stator et dans la culasse rotor sont respectivement symbolisées par $B_{gap_{max}}$, $B_{teeth_{max}}$, $B_{yoke_{max}}$, $B_{yokerot_{max}}$. Nous changeons la géométrie de notre moteur à l'aide du ratio diamètre / longueur à travers la variable $R_{drot_{lm}}$. Le bus de tension, le nombre de paires de pole et le nombre d'encoches par pole et par phase sont respectivement définis ici par $VuHVDC$, p , n_{epp} .

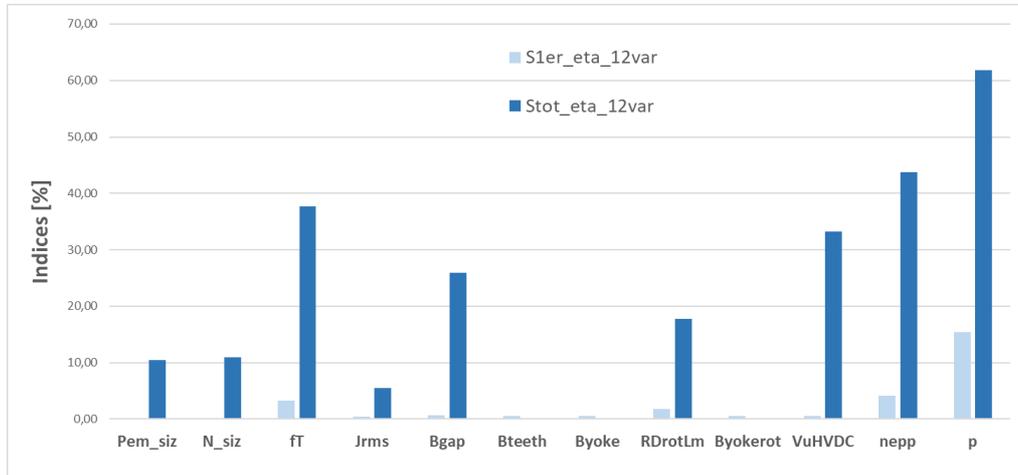


Figure 3 : Indices de Sobol : ordre 1 (bleu pâle) et total (bleu foncé) par rapport au rendement maximal machine.

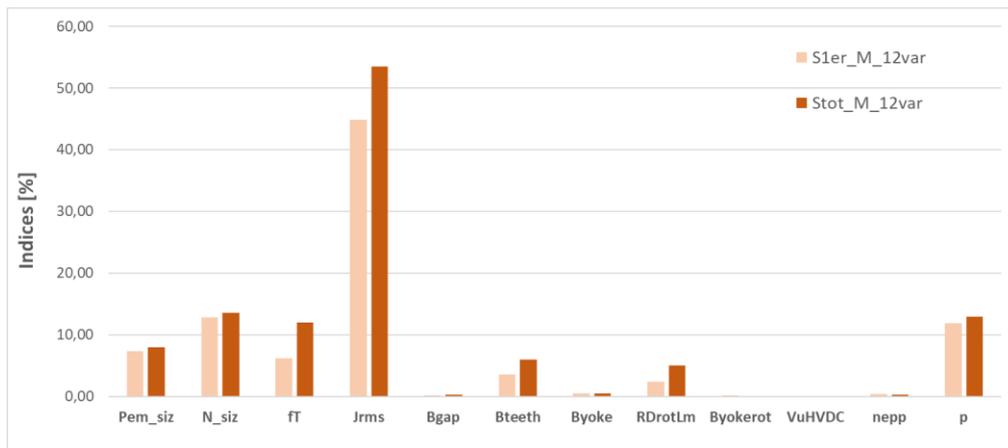


Figure 4 : Indices de Sobol : ordre 1 (orange pâle) et total (orange foncé) par rapport à la masse machine.

Nous rajoutons en plus du dimensionnement machine, un modèle de défluxage en appliquant une stratégie de pilotage à couple par ampère maximal afin d'estimer les pertes de la machine électrique au cours d'une mission définie au préalable. Nous considérons un système de refroidissement équivalent à 1 kW/kg de pertes extraites. Ici, les sorties (effets) que nous voulons évaluer via l'analyse de sensibilité sont le rendement et la masse, des facteurs qui sont décisifs dans le dimensionnement de la chaîne de propulsion hybride-électrique.

Nous avons des paramètres ($B_{yokerot}$, B_{yoke} , $VuHVDC$) qui n'influent pas au premier ordre, ni sur la masse ni sur le rendement. N'ayant pas d'influence sur les sorties du modèle nous pourrions simplifier notre problème en figeant ces paramètres à des valeurs préconisées par les experts du domaine. Cependant, nous devons aussi considérer la somme des indices de premier ordre. En effet si la somme des ordres premiers est relativement proche de 1 alors cela signifie qu'il existe peu de corrélations entre les variables et inversement. Ici, la somme des indices de premier ordre concernant le rendement de la machine (Figure 3) est autour de 35% cela signifie qu'il existe beaucoup de corrélation entre ces variables d'entrées, ce qui se traduit directement par l'indice total de Sobol qui est bien plus important que ceux du premier ordre. Par exemple, l'indice de premier ordre concernant la tension de bus $VuHVDC$ est proche de zéro, par contre cette variable a de grandes corrélations avec les autres variables d'entrées, ce qui nous empêche de figer ce paramètre dans une optimisation future. D'autant plus que ce paramètre aura un impact important sur la dimension des câbles ainsi que de l'onduleur de tension qui alimente le moteur électrique.

Contrairement aux résultats obtenus pour le rendement, l'étude de sensibilité sur la masse de la machine (Figure 4) possède des indices de premier ordre dont la somme est bien plus grande, autour de 84%. Dans ce cas, les corrélations entre variables d'entrées sont peu importantes et l'indice total est proche de l'indice de premier ordre.

Globalement, on retrouve dans tous ces résultats la logique connue des experts en termes de variables sensibles sur le rendement et la masse moteur. Nous retiendrons notamment que la polarité p de la machine est un paramètre clé du dimensionnement, tant en terme de rendement que de masse. La polarité sensibilise en effet directement les pertes fer du convertisseur électromécanique. La densité de courant (J_{rms}) est quant à elle très influente sur la masse mais moins sur le rendement, ce qui est à mettre en relation avec la plage de variations de cette valeur. En effet, cette variable varie dans un rapport élevé (~ 4), ce qui n'est pas le cas de certaines variables d'entrées dont les bornes de variations sont plus resserrées. C'est par exemple le cas de l'induction dans l'entrefer qui ne varie que de 20% environ. Cette dernière remarque suscite un point à souligner de façon plus générale : la sensibilité au sens des indices de Sobol dépend quantitativement des bornes de variations fixées lors de l'analyse.

5. Conclusion

Passer d'un avion classique à un avion à propulsion électrique n'est pas une mince affaire. Une analyse complète de chaque système doit être faite afin de l'optimiser au mieux. Cependant, lorsque le dimensionnement concerne plusieurs sous-systèmes connectés entre eux électriquement ou mécaniquement, il ne suffit pas d'optimiser localement chaque sous-système, indépendamment de ce qui se trouve autour. Ceci est l'objet du projet européen HASTECS : pouvoir obtenir des modèles de dimensionnement suffisamment précis dans le but d'être intégrés dans un premier temps puis optimisés globalement par la suite. Nous voyons dans notre processus d'intégration qu'un fort lien existe entre les technologies de rupture et l'efficacité d'un avion hybride-électrique. C'est pourquoi afin d'optimiser efficacement la chaîne de propulsion, nous devons analyser au préalable la sensibilité des paramètres dimensionnant (variables de décision de l'optimisation système) en entrée des modèles de comportement de tous les sous-systèmes. L'analyse de sensibilité va nous permettre de réduire le nombre de paramètres à optimiser en nous focalisant sur les plus significatifs en termes d'effets sur les sorties, en l'occurrence ici rendement et masse des constituant et du système propulsif.

Maintenant que nous avons appliqué l'analyse de sensibilité sur le modèle de dimensionnement d'un seul système électrique (le moteur électrique), les prochaines études seront concentrées sur l'ensemble des sous-systèmes électromécaniques.

Remerciements

Le projet HASTECS est soutenu par l'union Européenne [EU's Horizon 2020 (Cleansky 2 JTI) research and innovation programme, 2014-2024], grant agreement No 715483.

Références.

- [1]. X. Roboam, and B.Sareni, and André DeAndrade, More Electricity in the Air: Toward Optimized Electrical Networks Embedded in More-Electrical Aircraft. (2012) IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 6 (n ° 4). pp. 6-17. ISSN 1932-4529.
- [2]. Ralph H. Jansen, Dr. Cheryl Bowman, Amy Jankovsky, Dr. Rodger Dyson, and James Felder, "Overview of NASA Electrified Aircraft Propulsion Research for Large Subsonic Transports", AIAA Propulsion and Energy 2017 Forum; 10-12 Jul. 2017; Atlanta, GA; United States.
- [3]. J. Thauvin, "Exploring the design space for a hybrid-electric regional aircraft with multidisciplinary design optimisation methods", PhD Université de Toulouse, France, October 2018.
- [4]. M.Pettes-Duler · X.Roboam · B.Sareni, "Integrated design process of a hybrid electric propulsion system for future aircraft", Electrimacs conference, Salerno, Italy, May 2019.
- [5]. Mathilde Grandjacques, Alexandre Janon, Benoit Delinchant, and Olivier Adrot. Pick-freeze estimation of projection on the past sensitivity indices for models with dependent causal processes inputs. arXiv preprint arXiv :1403.5539, 2014.
- [6]. G. Chastaing, F. Gamboa, and C. Prieur. Generalized Sobol sensitivity indices for dependent variables: Numerical methods.
- [7]. Fabrice Gamboa, Alexandre Janon, Thierry Klein, Agnes Lagnoux-Renaudie, Clémentine Prieur. Statistical inference for Sobol pick freeze Monte Carlo method. Statistics, Taylor, 2013.